

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学 号: 19920101152785

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

采用无芯螺线管检测位移电流的方向

Measurement of the direction of displacement current with
the coreless solenoid

何竞彦

指导教师姓名: 翁梓华 教授

专 业 名 称: 仪器仪表工程

论文提交日期: 2013 年 5 月

论文答辩时间: 2013 年 6 月

学位授予日期: 2013 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2013 年 月

厦门大学博硕士论文摘要库

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为(翁梓华)课题组的研究成果,获得(翁梓华)课题(组)经费或实验室的资助,在(物理馆 310)实验室完成。

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学博硕士论文摘要库

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士论文摘要库

摘 要

麦克斯韦在 1861 年提出了位移电流的概念,此后许多学者对其展开了研究。目前一些学者已经在实验上检测了位移电流的幅值,但是还从未检测过位移电流的方向。课题组在 2010 年提出了直接在实验上检测位移电流的方向的设想。为此,本文提出以下两种方案,并展开相应的研究。

两个方案都是分别检测位移电流和传导电流在无芯的螺线管线圈的感应电动势相位,统计两种电流之间的相位差。再将其与传统理论进行相比,从而确认位移电流的方向。两个方案的位移电流都是通过钛酸钡电容器产生的。实验方案一,是在低压高频的情况下,测量两种电流在不同匝数的无磁芯螺线管线圈的感应电动势。实验结果通过两种方式测量:(a)直接通过示波器进行测量;(b)当幅值太小,通过锁相放大电路进行测量。实验方案二,是在高压低频的情况下测量位移电流的方向。虽然这两种方案是在不同情况下或者通过不同途径测量,但是实验结果应该具有一致性。

通过计算发现,位移电流的幅值比较微弱,容易受到外界干扰,因此测量位移电流的方向,需要考虑多方面的因素,减少实验结果的误差。(a)不同频率对实验影响;(b)钛酸钡电容器两端电压值对实验的影响;(c)方案一的锁相放大电路的精密度对实验影响;(d)方案二的功率放大器和变压器对实验的影响;(e)线圈匝数对实验的影响;(f)空心圆环的尺寸对实验的影响;(g)电容器的介电常数对实验的影响;(h)接地和屏蔽效果对实验的影响等等。

实验方案一,测量频率为 50KHz-1000KHz, $V_{pp}=20V$, 分别不同匝数的螺线管线圈展开研究,通过示波器测量的结果与传统理论相符,即传导电流与位移电流的相位差为 90 度。当线圈匝数为 146 匝,频率为 100KHz-110KHz,使用锁相放大电路测量的结果还是与传统理论比较符合,两者之间的相位差为 70 度。方案二,电压 700V-1000V,频率 7KHz-60KHz,测量结果仍与传统理论相符,两者之间的相位差为 85 度。但是在实验中,仍存在着一些不足之处,还有待于进一步的完善。

关键词: 位移电流; 传导电流; 相位

ABSTRACT

Maxwell proposed the concept of displacement current in 1861. Later many scholars have carried out research. Some scholars have now experimentally detected the amplitude of the displacement current, but no detected direction of the displacement current. Our research group proposed an idea to detect directly the direction of the displacement current in 2010. We proposed the following two programs, and expanded the corresponding research in this paper.

Two programs are separately detected the phase of the induced electromotive force of the displacement current and conduction current in the coreless solenoid coil, and counted the phase difference between them. Compared with theory, it was confirmed the direction of the displacement current. The displacement current generated through barium titanate capacitors in scheme one and scheme two. Scheme one is for high-frequency and low-voltage, and study the induced electromotive force of different turns of the non-core solenoid coil. The results measured in two ways, by an oscilloscope, and by the lock-in amplifier when the amplitude is too small. Scheme two is for high-voltage and low-frequency. While measured the direction of the displacement current by two ways and two schemes, the results of the direction of the displacement current should be consistent.

The amplitude of the displacement current is relatively weak and vulnerable to external disturbances. Therefore measuring the direction of the displacement current, we should consider factors to reduce the error of experimental results. (a) the frequency; (b) the amplitude of the voltage across the capacitor barium titanate; (c) the precision of lock-in amplifier in scheme one; (d) transformers and amplifier in scheme two; (e) coil turns; (f) the size of a hollow ring; (g) the dielectric constant of capacitor; (h) grounding and shielding and so on.

The frequency range of scheme one is 50KHz-1000KHz, and $V_{pp} = 20V$. The scheme studies solenoid coil turns which are different. The phase difference between the displacement current and conduction displacement is 90 degrees in scheme one,

which is consistence with theory. When the number of turns is 146, and the range of frequency is 100KHz-110KHz, the phase difference is 70 degrees by lock-in amplifier, which is still in line with theory. Scheme two, the range of voltage and frequency is respectively 700V-1000V and 7KHz-60KHz. The phase difference of scheme two is 85 degrees. But in the experiment, there are factors which are not taken into account, results still need to be further improved.

Keywords: displacement current; conduction current; Phase

目 录

摘 要.....	I
第一章 绪 论.....	1
1.1 麦克斯韦方程组.....	1
1.1.1 麦克斯韦方程组概述	1
1.1.2 麦克斯韦方程组的重要意义	2
1.2 位移电流.....	2
1.2.1 位移电流的数学推导过程	2
1.2.2 位移电流在平行板电容器的分布	3
1.2.3 位移电流和传导电流的异同点	3
1.2.4 国内外位移电流的研究进展	4
1.2.5 研究位移电流的意义	5
1.3 本文的主要研究工作.....	6
1.3.1 位移电流方向检测的总体设计	6
1.3.2 主要研究内容	8
1.3.3 论文的组成部分	9
1.4 本章小结	10
第二章 实验装置的介绍.....	11
2.1 实验使用仪器的规格以及型号	11
2.2 钛酸钡陶瓷电容器	11
2.3 变压器的制作	12
2.3.1 变压器的原理	13
2.3.2 磁芯的选择	13
2.3.3 线圈的匝数	14
2.3 无磁芯螺线管的制作	15
2.4 本章小结	15
第三章 噪声信号抑制和信号传输	16
3.1 干扰源	16
3.2 接地	19
3.2.1 同轴电缆屏蔽层的接地	19
3.2.2 电路的接地	21
3.3 屏蔽	25
3.3.1 静电屏蔽	25
3.3.2 电磁屏蔽	28
3.4 同轴电缆和连接器的选择	29
3.4.1 同轴电缆的选择	29
3.4.2 连接器的选择	30
3.5 本章小结	31

第四章 锁相放大电路的设计	32
4.1 锁相放大电路的原理	32
4.2 相敏检测	33
4.2.1 被测信号和参考信号都是正弦波	34
4.2.2 被测信号是正弦波含单频噪声，参考信号都是正弦波	36
4.3 锁相放大器的基本组成	37
4.4 测试信号通道的设计	39
4.4.1 前置放大电路的设计	39
4.4.2 带通滤波电路的设计	41
4.4.3 交流放大电路的设计	44
4.5 参考信号通道的设计	45
4.5.1 衰减电路的设计	45
4.5.2 移相电路的设计	46
4.6 乘法器 AD835 电路设计	47
4.7 后置放大电路设计	50
4.8 低通滤波电路设计	51
4.9 电路仿真	52
4.9.1 Multisim 软件介绍	53
4.9.2 各个部分电路和整体电路的仿真结果	54
4.10 PCB 板制作	56
4.10.1 PCB 布线技术	56
4.10.2 PCB 可靠布局	58
4.11 本章小结	59
第五章 低压高频采用无磁芯螺线管测量位移电流实验	60
5.1 实验模型的设计	60
5.2 实验原理	61
5.2.1 位移电流方向的验证方法	62
5.2.2 位移电流的幅值	63
5.2.3 无磁芯螺线管匝数与频率之间的关系	63
5.3 直接使用示波器测量	64
5.3.1 传导电流幅值不同，相位变化	64
5.3.2 位移电流方向判断	66
5.3.3 线圈匝数不同，对实验测量影响	70
5.4 使用锁相放大电路测量	71
5.4.1 实验框架介绍	71
5.4.2 在 100KHz-110KHz 实验测量情况	72
5.4.3 锁相实验存在的问题	73
5.5 本章小结	74
第六章 高压低频采用无磁芯螺线管测量实验	75
6.1 实验模型的设计	75
6.2 使用示波器测量	76

6.2.1 经过功放和变压器信号的变化	77
6.2.2 线圈螺线管匝数的选择	78
6.2.3 位移电流的方向判断	79
6.2.4 不同匝数对实验结果的影响	86
6.3 高压低频实验的结论	87
6.4 本章小结	88
第七章 结论与展望	89
参考文献	91
攻读硕士学位期间的论文	96
致 谢	97

CONTENTS

Abstract.....	II
Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 The equations of Maxwell	1
1.1.1 The overview of Maxwell's equations	1
1.1.2 The significans of Maxwell's equations.....	2
1.2 The displacement current.....	2
1.2.1 The mathematical derivation of the displacement current.....	2
1.2.2 The displacement current's distribution in a parallel-plate capacitor	3
1.2.3 The similarities and differences of the displacement currents and the conduction currents	3
1.2.4 The research of the displacement currents.....	4
1.2.5 The significans of the research of the displacement currents	5
1.3 Outline of Dissertation	6
1.3.1 The overall design of the measurement of the displacement current	6
1.3.2 The main contents	8
1.3.3 The parts of dissertation.....	9
1.4 Summary	10
Chapter 2 The introduction of the experimental apparatus.....	11
2.1 The specification of the instrument in experiments.....	11
2.2 Barium titanate ceramic capacitors	11
2.3 The production of the transformer.....	12
2.3.1 The principle of the transformer	13
2.3.2 The selection of core.....	13
2.3.3 The number of turns.....	14
2.3 The Production of coreless solenoid	15
2.4 Summary.....	15
Chapter 3 Noise suppression and signal transmission	16
3.1 Interference	16
3.2 Ground.....	19
3.2.1 The ground of Coaxial cable shield	19
3.2.2 Circuit ground.....	21
3.3 Shielding.....	25
3.3.1 Electrostatic shielding.....	25
3.3.2 Electromagnetic shielding	28
3.4 The selection of Coaxial cable and connector.....	29

3.4.1 The selection of Coaxial cable.....	29
3.4.2 The selection of connector.....	30
3.5 Summary.....	31
Chapter 4 The design of lock-in amplifier.....	32
4.1 The Principle of lock-in amplifier	32
4.2 Phase-sensitive detection	33
4.2.1 The measured signal and the reference signals are sine waves	34
4.2.2 The measured signal is a sine wave with a single frequency noise, the reference signals are sine	36
4.3 The basic components of lock-in amplifier	37
4.4 The design of Test signal channel	39
4.4.1 The design of Preamplifier circuit	39
4.4.2 The design of BPF	41
4.4.3 The design of AC amplifier	44
4.5 The design of reference signal channel.....	45
4.5.1 The design of attenuation circuit	45
4.5.2 The design of phase shift circuit.....	46
4.6 The design of AD835	47
4.7 The design of post-amplifier circuit.....	50
4.8 The design of LPF	51
4.9 Simulation.....	52
4.9.1 The introduction of Multisim.....	53
4.9.2 The simulation of parts of the circuit and the whole circuit.....	54
4.10 The production of PCB.....	56
4.10.1 layout of PCB	56
4.10.2 reliable layout of PCB	58
4.11 Summary.....	59
Chapter 5 The measurement of displacement currents with the coreless solenoid in low-voltage and high frequency	60
5.1 The design of model	60
5.2 The principle of the experiences	61
5.2.1 The authentication method of the direction of displacement current	62
5.2.2 The magnitude of the displacement current.....	63
5.2.3 The relationship of Coreless solenoid turns and frequency	63
5.3 Measurement with an oscilloscope	64
5.3.1 Phase shift with the changement of the conduction currents.....	65
5.3.2 The judgement of the direction of the displacement current	66
5.3.3 The influence of experiments with the numbers of turns	70
5.4 The measurement with lock-in amplifier.....	71
5.4.1 The introduction of experimental framework.....	71
5.4.2 The measurement of the experiments in 100KHz-110KHz.....	72

5.4.3 The problem of the the measurement with lock-in amplifier	73
5.5 Summary.....	74
Chapter 6 The measurement of displacement currents with the	
coreless solenoid in high-voltage and low frequency	75
6.1 The design of model	75
6.2 Measurement with an oscilloscope	76
6.2.1 The changement after the amplifier and transformer	77
6.2.2 The numbers of turns	78
6.2.3 The judgement of the direction of the displacement current	79
6.2.4 The influence with the changement of turns.....	86
6.3 The discussion of the experiment in high-voltage and low frequency.....	87
6.4 Summary.....	88
Chapter 7 Conclusion and Prospetions.....	89
References	91
Publication and Project	96
Acknowledgement	97

厦门大学博硕士论文摘要库

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库